doi:10.13866/j.azr.2019.01.08

锡林河流域径流量变化对气候变化与人类活动的响应①

张艳霞[1]， 于瑞宏[1,2]， 薛 浩[1]， 多 兰[1]， 胡海珠[1,2]， 吕喜玺[1]

(1. 内蒙古大学生态与环境学院,内蒙古自治区河流与湖泊生态重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010021;
2. 蒙古高原生态学与资源利用教育部重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010021)

摘 要: 选取锡林河集水区域为研究区,基于1968—2015年水文和气象数据序列,采用Mann-Kendall趋势检验进行趋势分析,采用Mann-Kendall突变检验和双累积曲线法进行突变分析,继而利用双累积曲线法、累积量斜率变化率比较法及弹性分析法定量研究气候变化和人类活动对径流量影响的贡献率。研究表明:1968—2015年,锡林河流域年径流量呈显著下降趋势,且在1984年和2000年发生突变。基于此,将1968—1984年作为基准期、1985—2000年和2001—2015年则作为突变期;双累积曲线法得出的人类活动对径流影响贡献率介于86%~88%,与其他方法所得结果相差较大,而累积量变化率比较法则同时考虑降雨和蒸发对径流的影响,与弹性系数法得出的结果基本一致,贡献率分别介于52.44%~69.02%(1985—2000年)和42.39%~43.64%(2001—2015年)。综合而言,不同定量方法具有不同的基础和结构,使用包含多方法集成的弹性系数法相对于经验性统计法而言更可靠,且更适于锡林河流域径流量的定量响应研究。

关键词: 径流量变化; 人类活动; 气候变化; 定量响应; 锡林河流域

径流量对气候变化与人类活动的响应是现阶段水资源演变规律研究中的热点科学问题[1]。目前,开展气候变化和人类活动对径流定量响应研究方法主要包括经验统计法、弹性系数法和水文模型等3类[2]。Ahn等[3]选取美国4个区域为研究对象,采用线性回归分析法、水量平衡法、水文模型法和水文敏感性分析法4种方法分析气候变化和人类活动对径流的影响,分析表明4种方法在4个研究区的结果接近;Zeng等[4]以漳河流域为研究区,从年、季、月尺度,采用模型和弹性系数法研究径流量对气候变化和人类活动的定量响应,结果表明湿季和旱季季风性径流量对人类活动响应的贡献率分别为57%和28%;Wang等[5]得出,人类活动对黄河径流变化的贡献率达到92.07%;杨立哲等[6]采用M-K趋势分析及降雨径流双累积曲线法,研究了锡林河流域径流量的年内、年际变化特点;宋小园等[7-8]针对人类活动和气候变化影响下锡林河的水文响应机制,选择基准期为1963—1985年,在不考虑潜在蒸散量变化的影响下,1986—1999年和2000—2011年人类活动对于径流量减少的贡献率分别为73.70%和42.64%;焦玮[9]研究了1963—2012年锡林河流域河川基流对气候变化与人类活动的响应特征,选取1979、1991年和1998年为突变年份,划分出基准期和措施期,得出在措施期内人类活动对基流的贡献率分别为45.85%、69.76%和56.24%;段利民等[10]研究得出,近45 a来锡林河流域年径流量显著下降,1979、1986年和1998年为突变年份,1980—1986年人类活动对径流减少的贡献率为46.57%;1987—1998年人类活动对径流增加的贡献率高达91.46%;1999—2014年人类活动对径流减少的贡献率为66.16%。尽管许多学者已在锡林河流域开展了部分研究,但考虑到已有研究方法的单一性和局限性,多方法验证识别更有利于气候变化及人类活动对流域径流量变化贡献率的准确估算。

锡林河流域位于大兴安岭西侧,降水少、蒸发量多、日温差大。年内气候变化明显,四季分明,春季干燥多风,湿度低;夏季降雨主要集中于6—8月;秋

① **收稿日期:** 2018-06-21; **修订日期:** 2018-08-26
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500508);国家自然科学基金项目(51469018,51609118)资助
作者简介: 张艳霞(1993-),女,硕士生,研究方向为水文水资源
通讯作者: 于瑞宏. E-mail:yrh0108@163.com

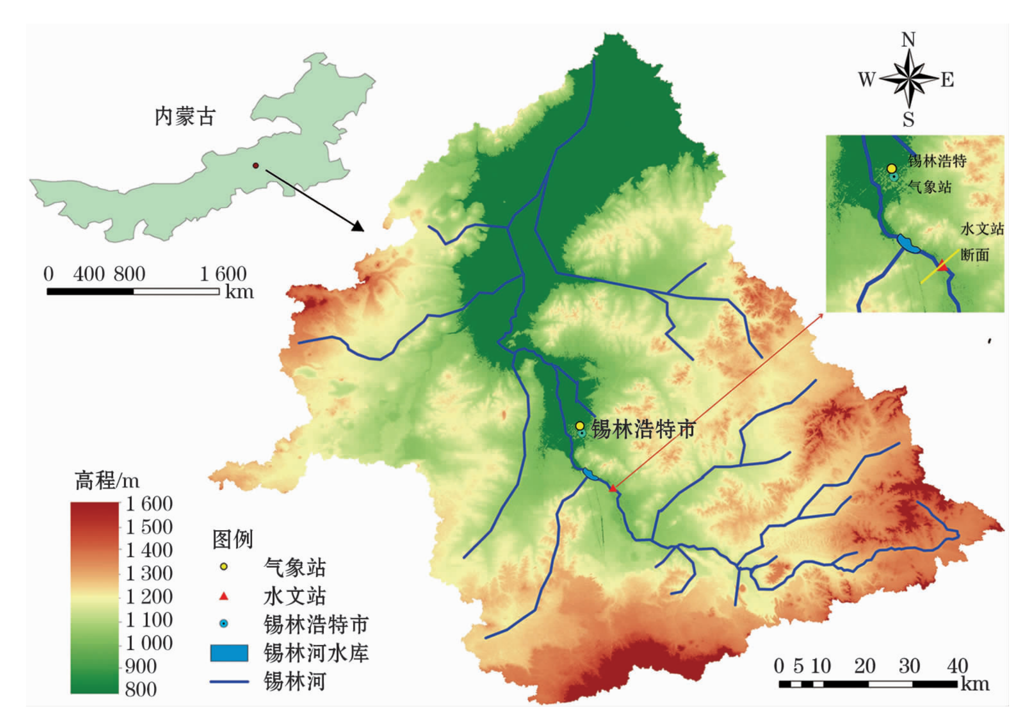


图 1 锡林河流域示意图

Fig. 1 Schematic map of the Xilin River Basin

季凉爽,时间短暂;冬季漫长寒冷,无霜期短,冻土深,湿度低,干旱、风雪、冰雹、霜冻等自然灾害频发[11]。属中国干旱、半干旱地区典型的草原型河流。近年来,由于矿产资源过度开发,草原生态系统下垫面遭到严重破坏,水资源时空分布格局明显改变,加之依赖小流量河流补给的草原区水资源系统的脆弱性[12],在气候变暖和极端事件频发的背景下,研究锡林河径流变化规律,定量分析人类活动和气候变化对径流量的贡献率,有助于了解内陆河流域水文循环过程的演变规律。本文在已有研究基础上,采用经验统计法及弹性系数法两大类 7 种方法开展径流量对气候变化和人类活动定量响应研究,以期使研究结果更为准确可靠。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

锡林河发源于赤峰市克什克腾旗宝尔图西南山顶,全长 268.1 km。锡林河流域(图 1)地处 115°32′~117°16′E,43°26′~44°39′N,流域面积 10 542 km^2,水库控制面积 3 852 km^2,锡林浩特水库以下近 124.7 km 的河流已断流。根据 1968—2015 年水文气象资料统计,流域以锡林浩特水文站日径流序列实测数据作为数据源,多年平均降水量为 278.9 mm,多年平均蒸发量为 1 862.9 mm(20 cm 蒸发皿);多年平均气温为 2.8 ℃,极端最高气温为 31.6 ℃,极端最低气温为 −33.1 ℃;多年平均风速为 3.4 m·s^{-1},最大风速为 14.5 m·s^{-1};多年平均径流量为 2.1×10^7 m^3。伴随全球气候变化,加之过度放牧、煤矿开采、水利工程建设等人类活动,锡林河流域水文水资源问题不断凸显,河流径流量显著下降,甚至断流,草场退化及土壤沙化等问题亦相继频现。

1.2 数据来源

本研究水文数据选取锡林浩特水文站 1968—2015 年的日径流实测数据序列,气象数据选取锡林河流域气象站 1968—2015 年的逐日气象数据(包括降水量、气温、蒸发量、风速、相对湿度、气压、水汽压、日照时数等)。

2 研究方法

2.1 趋势及突变分析

本研究运用滑动平均法、累积距平法、线性回归法、Mann-Kendall 非参数统计检验法,揭示水文气象数据序列的趋势性变化。采用 Mann-Kendall 突变检验用于径流突变分析,同时应用双累积曲线作为突变点的辅助检验。Mann-Kendall 检验法是由世界

气象组织推荐,Mann 和 Kendall 最早提出[13-14],已成功应用于气温、水质、降水和径流等要素的趋势及突变变化分析中[15]。该方法的特点在于样本无需遵从一定的分布,避免少数异常值的干扰,在水文、气象等非正态分布的数据中适用性良好,计算简便[16]。

2.2 径流量对气候变化和人类活动的定量响应分析

对于一个确定的流域,径流量改变是气候变化和人类活动共同作用的结果,可表示为:

$$\Delta Q = \Delta Q_C + \Delta Q_H \quad (1)$$

式中:ΔQ 为径流变化总量;ΔQ_C 为径流对气候变化响应的变化量;ΔQ_H 为径流对人类活动响应的变化量。

同时,通过计算突变点前后两个时期实测径流量的差值,即可得到径流变化总量,即:

$$Q = \overline{Q_2} - \overline{Q_1} \quad (2)$$

式中:$\overline{Q_1}$ 为基准期实测径流量的平均值;$\overline{Q_2}$ 为突变期实测径流量的平均值。量化径流量对气候变化和人类活动的响应需要计算出 ΔQ_C 和 ΔQ_H 中的一个因子,另一个因子即可通过式(1)计算得出。

本文在考虑潜在蒸散发和实际蒸散发的基础上,采用 2 种经验统计法及 5 种弹性分析法定量分析气候变化和人类活动对径流量的影响,旨在找出适于干旱半干旱地区草原型河流贡献率的计算方法。

2.2.1 传统经验型统计法 双累积曲线法是目前应用于水文要素一致性或长序列趋势及突变分析中最简单、直观、广泛的方法[17],通过判定两个变量累积值之间直线斜率发生突变的位置,即可确定二者关系发生突变的时间[18]。

累积量斜率变化率比较法(SCRCQ 法)[19]的原理为:基准期和突变期累积降水量—年份线性关系的斜率分别为 K_{P_a}、K_{P_b}(mm·a^{-1}),斜率变化率为 S_P;累积蒸发量—年份线性方程的斜率分别为 K_{E_a}、K_{E_b}(mm·a^{-1}),斜率变化率为 S_E;累积径流量—年份线性方程的斜率分别为 K_{R_a}、K_{R_b}(mm·a^{-1}),斜率变化率为 S_R,则累积变化量斜率变化率为突变期累积变化量—年份线性关系的斜率差值与基准期内累积变化量—年份线性关系的斜率比值。

以降水和蒸发代表气候变化影响的变量,降水对径流量变化贡献率(C_P)为:

$$C_P = \frac{100 \times S_P}{S_R} \quad (3)$$

蒸散发对径流量变化的贡献率(C_E)为:

$$C_E = \frac{100 \times S_E}{S_R} \quad (4)$$

人类活动对径流量变化的贡献率(C_H)为:

$$C_H = 100 - C_P - C_E \quad (5)$$

上述式中:下标 R 代表径流量;P 代表降水量;E 代表蒸发量。

2.2.2 弹性分析法 气候变化将导致降水及潜在蒸发能力的变化,从而引起径流量发生相应变化。通过分析径流对降水及潜在蒸散发的敏感性系数,径流量对气候变化的定量响应可表示为:

$$\Delta Q_C = \varepsilon_P \frac{Q}{P}\Delta P + \varepsilon_{E_0} \frac{Q}{E_0}\Delta E_0 \quad (6)$$

式中:E_0 代表潜在蒸发量;ε_P 和 ε_{E_0} 分别为径流对于降水和潜在蒸发的弹性系数;ΔP 和 ΔE_0 分别为降水和潜在蒸散发的变化。根据流域长时段水量平衡公式($Q = P - E_a$) 及 Budyko 假设[20],流域实际蒸散发量 (E_a)为干燥指数($\phi = E_0/P$)的函数,弹性系数计算公式可表示为:

$$\varepsilon_P = 1 + \frac{\phi F'(\phi)}{1 - F(\phi)}, \text{且 } \varepsilon_P + \varepsilon_{E_0} = 1 \quad (7)$$

其中,$F(\phi)$ 和 $F'(\phi)$ 可通过以下几种 Budyko 假设计算(表 1)。

表 1 5 种常用的基本 Budyko 假设的 $F(\phi)$ 和 $F'(\phi)$ 表达式

Tab. 1 Five basic Budyko assumptions in common use

来源文献	$F(\phi)$	$F'(\phi)$
[21]	$\phi\tanh(1/\phi)$	$\tanh(1/\phi) - 4[\phi(e^{-1/\phi} + e^{1/\phi})^2]$
[22]	$[\phi\tan(1/\phi)(1 - e^{-\phi})]^{0.5}$	$0.5[\phi\tanh(1/\phi)(1 - e^{-\phi})]^{-0.5} \times \left[\begin{matrix}(\tanh(1/\phi) - \mathrm{sech}^2(1/\phi)/\phi \\ (1 - e^{-\phi}) + \phi\tanh(1/\phi)e^{-\phi}\end{matrix}\right]$
[23]	$(1 + \phi^{-2})^{-0.5}$	$1 \Big/ \left\{\phi^3\left[1 + (1/\phi)^2\right]^{1.5}\right\}$
[24]	$1 + \phi - (1 + \phi^{\alpha})^{1/\alpha}, \alpha = 2.5$	$1 - (1 + \phi^{\alpha})^{1/\alpha - 1}\phi^{\alpha - 1}$
[25]	$(1 + w\phi)/(1 + w\phi + 1/\phi), w = 1$	$(w + 2w/\phi - 1 + 1/\phi^2)/(1 + w\phi + 1/\phi)^2$

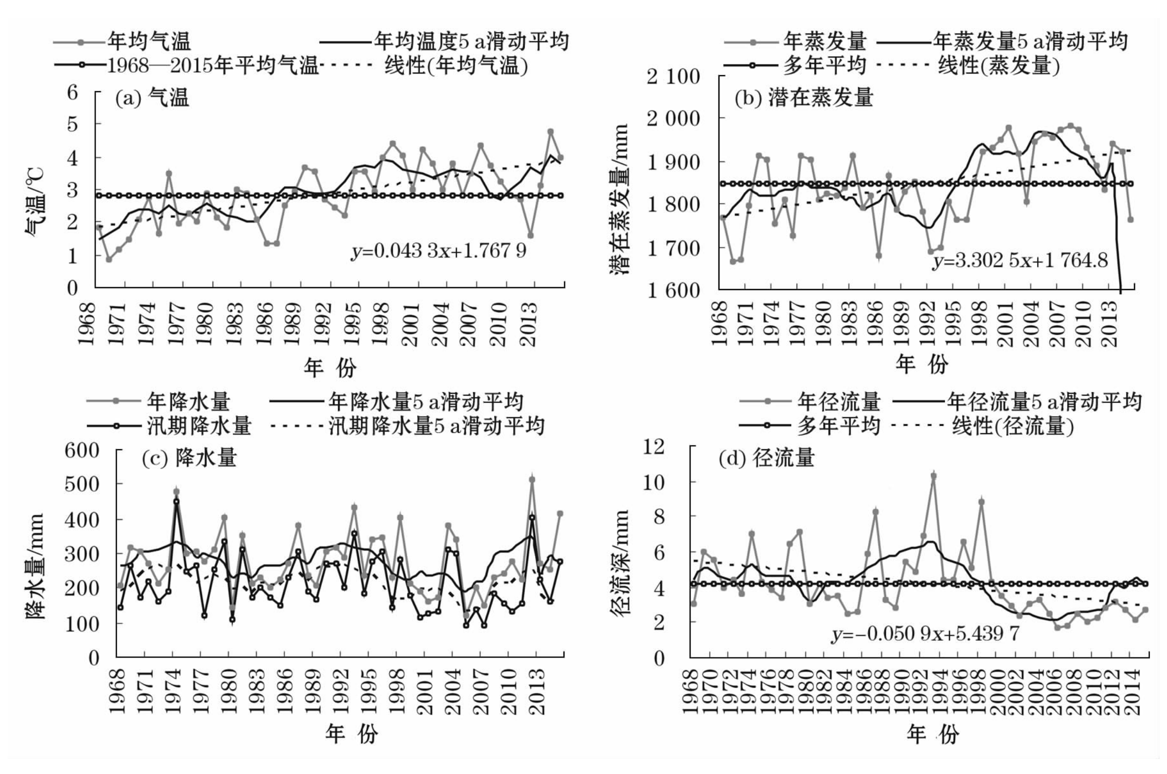


图 2　1968—2015 年各水文气象要素年际趋势变化

Fig. 2　Inter-annual trends of meteorological and hydrological factors during the period of 1968 – 2015

3　结果与讨论

3.1　水文气象要素变化特征

3.1.1　水文气象要素趋势分析　从图 2 和表 2 可以看出,年平均气温呈增加趋势;年平均潜在蒸发量呈显著上升趋势,线性变化速率为 3.3 mm · a^{-1},变差系数为 0.05,变幅较小;年降水量和汛期降水量变化均不显著;年径流量变化呈显著下降趋势,21 世纪以后变化极为明显。

从图 3 可知,锡林河流域径流量呈现出不规则的周期性波动,20 世纪 80 年代以来,径流量波动变化比较大;20世纪80年代后期和90年代前期径流

表 2　1968—2015 年气象和水文系列年际变化及 Mann-Kendall 趋势检验

Tab. 2　Inter-annual variation of the meteorological and hydrological series during the period of 1968 – 2015 and Mann-Kendall trend test

	气温/(℃ · a^{-1})	径流量	降水量	潜在蒸发量
		/(mm · a^{-1})		
变化趋势	0.04	-0.05	-0.03	3.30
Zc	4.61	-3.39	-0.31	3.80
显著水平	***	***	–	***

注:*** 表示在 0.01 水平上显著。

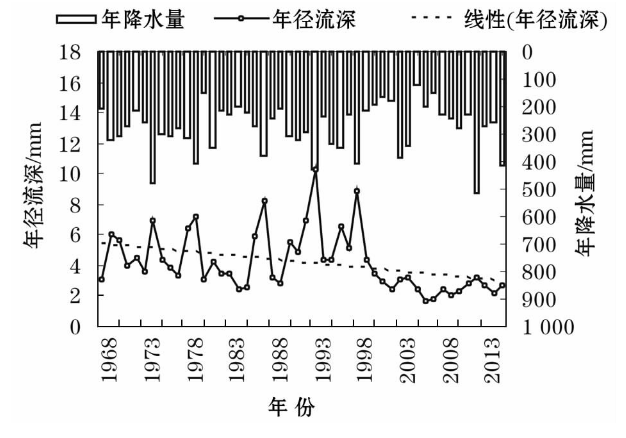


图 3　1968—2015 年锡林河流域年径流与降水变化过程

Fig. 3　Variations of annual runoff volume and precipitation in the Xilin River Basin during the period of 1968 – 2015

量呈现增加趋势;90 年代径流量高于多年平均值;20 世纪末 21 世纪初径流量呈现极显著减少趋势。1968—2015 年的多年平均径流深为 4.19 mm,最大年径流深 10.25 mm(1993 年),最小年径流深 1.68 mm(2006 年),极值比为 6.11。

3.1.2　水文气象要素突变分析　应用 M-K 突变检验法分析 1968—2015 年锡林河流域年气温、降水量、潜在蒸发量、径流量等水文气象要素年际突变过程,给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,即 $U_{0.05} = \pm 1.96$,并

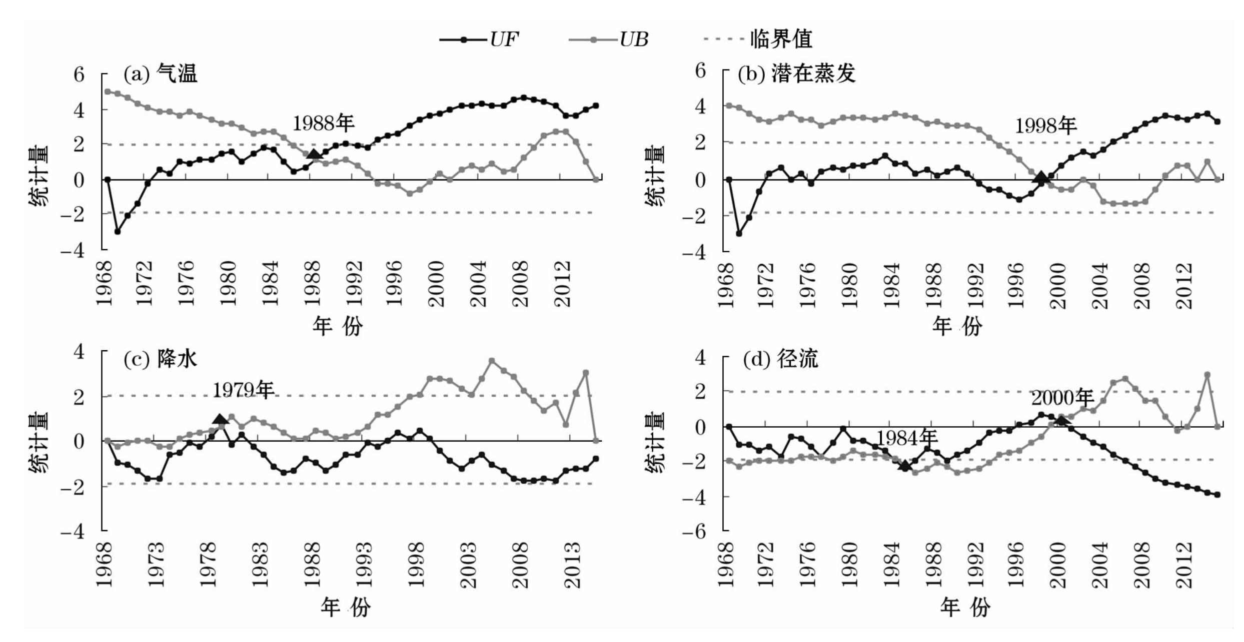


图 4　1968—2015 年不同水文气象要素年际 M-K 突变检验

Fig. 4　M-K mutation test of different meteorological and hydrological factors during the period of 1968 – 2015

利用 Anaconda 2.7 软件得到 *UF*、*UB*,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,1986—2015 年锡林河流域气温呈显著上升趋势,在 1988 年发生突变(图 4a);降水波动不显著,在 1979 年出现突变(图 4b);潜在蒸发呈显著上升趋势,在 1988 年发生突变(图 4c);径流量呈显著减少趋势,分别在 1984 年和 2000 年发生突变(图 4d),这与宋小园、焦玮等[7-8]研究结果接近,20 世纪 90 年代出现一定程度的增加,从 2001 年开始又出现明显的减少趋势,且超过 0.05 显著性水平($U_{0.05}$ = −1.96),甚至超过 0.01 显著性水平($U_{0.01}$ = −2.58),表明锡林河流域径流量减少趋势极其显著。其中当显著性水平分别设定为 0.01、0.05、0.1 时,对应的统计量临界检验值分别为 ±2.58、±1.96 和 ±1.65。

总体而言,锡林河流域气温、潜在蒸发量均呈增加趋势,降水量、径流量则呈减少趋势。同时,采用径流—降水双累积曲线法识别径流序列发生突变的临界年份,互为验证,结果如图 5 所示。

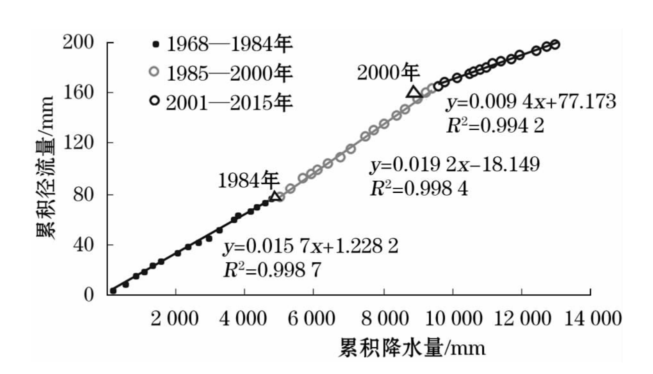


图 5　1968—2015 年锡林河流域年降水量和径流量的双累积曲线

Fig. 5　Double cumulative curves of annual precipitation and runoff volume in the Xilin River Basin during the period of 1968 – 2015

由图 5 可以看出,在人类活动和气候变化的双重作用下,双累积曲线斜率在 1984、2000 年发生明显变化,且 3 个阶段线性拟合趋势线斜率呈现先增加后减少的趋势,R^2 分别为 0.998 7、0.998 4、0.994 2,尤其是第一阶段(1968—1984 年)和第二阶段(1985—2000 年)R^2 均超过 0.998,说明线性拟合程度较高。综上所述,本研究将降水—径流变化过程分为 3 个阶段:1968—1984 年、1985—2000 年和 2001—2015 年,其中 1985 年之前,径流量变化主要受气候变化尤其是降水量变化的影响,1968—1984 年为近似天然径流阶段,看作基准期,人类活动对锡林河流域的干预较少。此后,人类活动的影响逐渐增大,径流量的变化除了受到降水量等自然因素的影响外,还包括人类活动的影响;1985—2000 年、2001—2015 年为气候变化和人类活动双重作用影响变强阶段,降水对径流产生影响,人类亦通过改变下垫面间接产生影响,尤其是 21 世纪以来径流变化显著,该结果与 M-K 检验 *UF-UB* 统计结果一致。

由图6可见,随着时间推移,1985—2000年年

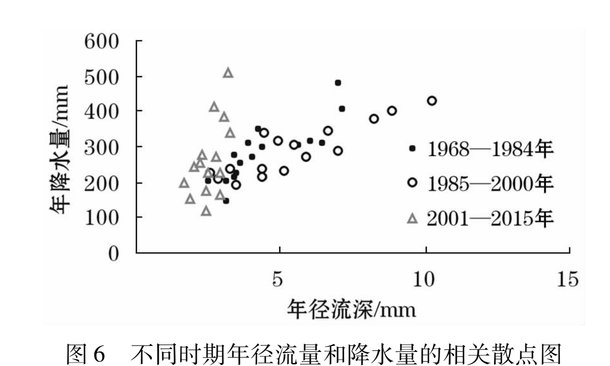


图 6　不同时期年径流量和降水量的相关散点图

Fig. 6　Scatter diagram of annual runoff volume and precipitation in different periods

径流量和降水量二者关系整体向右推移,说明相同量级降水量下径流量相应增加;然而 2001—2015 年二者关系点向左推移且极其显著,说明相同量级降水量下径流量明显减少,间接验证了非降水因素对径流量影响的可能性。

3.2　径流量对气候变化和人类活动的定量响应

3.2.1　双累积曲线法定量区分径流变化影响因子　根据 M-K 突变检验结果,将研究时段划分为 3 个阶段:1968—1984 年(基准期)、1985—2000 年(突变期)、2001—2015 年(突变期)。

年平均降水序列与年平均径流量的线性回归方程可表示为:

$$\overline{R} = 0.014\,6\overline{P} - 0.344\,4 \tag{8}$$

锡林河流域不同时段理论年均径流量可以由式(8)计算求得,突变期实测径流量与基准期实测值之间的差值包括人类活动影响和降水变化影响两部分,其中突变期降水量对径流量变化的影响值可由基准期实测值与各时段的计算值差值得到。计算结果见表 3。

3.2.2　累积量斜率变化率分析方法区分径流变化影响因子　该方法中,以 1984、2000 年 2 个突变年份为界,将各变量累积量的变化阶段划分为 3 个阶段,1968—1984 年为 *Ta*,1985—2000 年为 *Tb*,2001—2015 年为 *Tc*,根据 SCRCQ 法计算各阶段线性关系斜率的变化率(表 4)。根据公式分别估算各影响因素对径流量变化的贡献率,结果见表 5。

表 3　锡林河流域降水和人类活动对径流影响的计算结果

Tab. 3　Calculated results of the effects of precipitation and human activities on runoff volume in the Xilin River Basin

起止年份	降水量/mm	年均径流量/mm		总减少	降水因子		人类活动因子	
		实测值	计算值		影响值	影响率/%	影响值	影响率/%
1968—1984	282.08	4.45						
1985—2000	289.36	5.47	4.57	-1.02	-0.12	11.67	-0.90	88.33
2001—2015	264.12	2.54	4.20	1.91	0.25	13.09	1.66	86.91

表 4　不同时段各累积量斜率变化率

Tab. 4　Change rates of cumulative slope in different periods

时期	径流量 R		降水量 P		蒸散发量 E	
	斜率 K_R	变化率 S_R/%	斜率 K_P	变化率 S_P/%	斜率 K_E	变化率 S_E/%
Ta	4.64		296.18		1 006.9	
Tb	5.79	24.82	302.49	2.13	1 104.3	9.67
Tc	2.46	-57.56	259.89	-14.08	901.58	-18.36

表 5　不同时段气候变化和人类活动对径流影响的贡献率

Tab. 5　Contribution rates of climate change and human activities to runoff volume in different periods

时期	C_P+C_E/%	C_H/%
Tb	47.56	52.44
Tc	56.36	43.64

3.2.3　弹性系数法定量区分径流变化影响因子　按照年时间尺度,采用 5 种基于 Budyko 假设的函数形式,计算不同阶段径流对降水的弹性系数及各因子对径流变化的影响,1985—2000 年的计算结果见表 6,2001—2015 年的计算结果见表 7。

3.3　讨论

3.3.1　不同方法比较　表 8 对比了双累积曲线、累积量变化率比较法及基于弹性系数法(5 种方法平均值)的计算结果。对双累积曲线、累积量斜率变化率分析和弹性系数 3 种分析方法,分割出人类活动影响径流量均采用年径流量和年降水总量。在 2 个突变期内,双累积曲线法得出的人类活动对径流影响贡献率介于86% ~88%,与其他方法所得结

表 6 1985—2000 年弹性系数法对气候变化和人类活动影响的定量区分

Tab. 6 Quantitative distinction between climate change and human activities during the period of 1985 – 2000, based on the elastic coefficient method

	εp	ΔQ_C/mm	ΔQ_H/mm	ΔQ_C/%	ΔQ_H/%
Ol'dekop	2.98	0.38	0.64	37.06	62.94
Budyko	3.75	0.47	0.54	46.63	53.37
Pike	2.96	0.37	0.64	36.85	63.15
傅抱璞	2.49	0.32	0.70	30.98	69.02
Zhang 等	2.82	0.36	0.66	35.12	64.88
平均值	3.00	0.38	0.64	37.33	62.67

表 7 2001—2015 年弹性系数法对气候变化和人类活动影响的定量区分

Tab. 7 Quantitative distinction of the effects of climate change and human activities during the period of 2001 – 2015 based on the elastic coefficient method

	εp	ΔQ_C/mm	ΔQ_H/mm	ΔQ_C/%	ΔQ_H/%
Ol'dekop	2.98	-1.10	-0.81	57.61	42.39
Budyko	3.63	-1.38	-0.53	72.43	27.57
Pike	2.97	-1.09	-0.82	57.27	42.73
傅抱璞	2.49	-0.89	-1.02	46.41	53.59
Zhang 等	2.84	-1.04	-0.87	54.27	45.73
平均值	2.98	-1.10	-0.81	57.60	42.40

表 8 不同阶段 3 种方法对气候变化和人类活动影响的定量区分

Tab. 8 Quantitative distinction of the effects of climate change and human activities at different stages based on three methods

时 段	双累积曲线		弹性系数法		累积量变化率比较分析法	
	气候变化/%	人类活动/%	气候变化/%	人类活动/%	气候变化/%	人类活动/%
1985—2000	11.67	88.33	37.33	62.67	47.56	52.44
2001—2015	13.09	86.91	57.60	42.40	56.36	43.64

果相差较大,原因在于该法仅考虑了降水对径流的影响,并未考虑蒸发量等其他因素的影响;而累积量变化率比较法则同时考虑降雨和蒸发对径流的影响,如果量化出该法中降水对径流的贡献率(8.58% 和 24.46%),其与双累积曲线中降水对径流贡献率(11.67% 和 13.06%)相近。此外,弹性系数法和累积量变化率比较法得出的结果基本一致,这些方法计算得到的人类活动对径流影响的贡献率分别为 52.44% ~ 69.02%(1985—2000 年)和 42.39% ~43.64%(2001—2015 年)。与经验性统计法相比,弹性系数法不仅考虑了潜在蒸发的影响,且基于 Budyko 水热平衡耦合理论和水量平衡方程分析径流对于降水和蒸发的敏感性,与真实水循环过程更接近。然而,基于不同的 Budyko 假设函数也可能得出不甚一致的结论,如 Ol'dekop、傅抱璞、Zhang 等、Turc-Pike 与 Budyko 得出的结论之间的差别,原因在于基于不同 Budyko 水热平衡耦合理论所包含的函数参数变化。基于此,采用平均值可减少不确定性,用于定量评估更加合理。Wu 等[26]采用多种方法定量分析气候变化和人类活动对径流的影响,同样得出弹性系数法所得到的结果更加合理。综上所述,不同定量方法具有不同的基础和结构,采用包含多方法集成的弹性系数法相对于经验性统计法而言,更加准确可靠。

3.3.2 不同阶段人类活动及气候变化对径流量贡献率变化原因分析 由以上分析可知,1984—2000 年锡林河流域人类活动影响大于气候变化,2000 年以后人类活动影响呈小幅降低趋势,2001—2015 年气候变化对径流影响略大于人类活动,为气候变化和人类活动双重作用变强的阶段,该结果与焦玮[9]、李玮[27]等的研究结果基本一致。

1985—2000 年径流量呈现一定程度的增加趋势,与基准期相比增加 22.84%。其原因可能是:自 20 世纪 80 年代中期开始,人口增长速度有所减缓;相较 1968—1984 年及 2001—2015 年 2 个时段,该时段锡林郭勒盟牲畜总量增加了将近 2 倍,过度放牧、超载养畜、水利工程等人类活动导致锡林河流域下垫面改变,削弱了下垫面对雨水的拦蓄作用[28],在一定程度上会影响径流规律,造成径流量加大。1985—2000 年流域降水增加,造成锡林河流域径流量增加 3 600 m^3,潜在蒸发量的减少造成锡林河流域径流量增加 3 550 m^3,人类活动造成流域径流量增加 10 m^3。

2001—2015 年径流量呈现明显的减少趋势,突变点明显,与基准期相比降幅达到 42.4%,气候变化影响略大于人类活动,说明人类活动和气候变化的双重作用导致径流量的减少。就气候变化而言,气温突变和趋势检验结果表明,21 世纪以来气温呈明显上升趋势,与全球变暖趋势相一致[29],加之降水量减少 6.37%,潜在蒸发量增加 5.88%,导致径

流量在一定程度上减少。就人类活动而言，尽管从2000年开始，锡林郭勒盟开展了一系列的生态保护工作，包括“双权一制”[30]“退耕还林还草”“围封禁牧”“天然林保护工程”“京津风沙源治理”[31]等水土保持措施，防治了水土的流失，增加了蓄水，一定程度上减轻了人类活动对径流的影响；还通过增加植被盖度或林草生长，减少出口断面的径流量。然而，第二、三产业的迅猛发展，尤其是煤炭、石油等矿产资源的过度开采，矿点较多从而消耗水量，地表水利用量及地下水开采量不断加大，加之灌溉引水强度的增加，导致2000年后锡林河流域径流量明显下降。根据基于Budyko水热平衡耦合理论的弹性系数法量化分析出降水及蒸发对径流的影响，从而量化出人类活动对径流量的影响。2001—2015年流域降水减少和潜在蒸发量增加，造成锡林河流域径流量减少1.04×10^4 m^3，人类活动造成流域径流量减少8 700 m^3。

4 结论与展望

4.1 结论

（1）锡林河流域气温、潜在蒸发均呈显著增加趋势，降水量波动不明显，径流量呈显著减少趋势。

（2）径流量在1984年和2000年发生突变，基于此，将1968—1984年作为基准期、1985—2000年和2001—2015年作为突变期。其中，1985—2000年径流呈增加趋势，较基准期增加22.84%，同时降水增加5.2%，潜在蒸发量减少1.4%；2001—2015年径流呈减少趋势，较基准期减少28.9%，同时降水增加2.58%，潜在蒸发量减少0.01%。

（3）突变期1985—2000年，利用双累积曲线法、累积量斜率变化率分析法及弹性系数法计算的人类活动对径流量影响的贡献率分别为88.33%、52.44%和62.67%，人类活动在该时期径流变化中起主导作用，造成流域径流量增加6 600 m^3；突变期2001—2015年，3种方法计算的人类活动对径流量影响的贡献率分别为86.91%、43.64%和42.40%，双累积曲线法数值偏大，累积量斜率变化率分析法与弹性系数法得出的结论基本一致，气候变化较人类活动对径流的影响略大，人类活动约造成流域径流量减少8 700 m^3。依据方法的基础和结构，采用包含多方法集成并配合水热平衡耦合理论的弹性系数法相对于经验性统计法而言，更加准确可靠。

4.2 展望

（1）本文采用经验统计法和弹性系数法开展径流量对气候变化与人类活动的定量响应分析，其中所涉及的水文气象参数有限，未来可使用分布式或半分布式水文模型进一步开展相应研究，以期得到更为准确可靠的研究结论。

（2）人类活动影响对径流量变化不容忽视，但由于社会经济资料的缺乏，文中未深入定量揭示已实施的生态保护、水土保持、亦或资源过度开发等对径流量造成的影响，并探讨其机制，未来可进一步深化该领域的研究，以期揭示人类活动对径流量影响的症结所在，为流域生态修复提供决策依据。

参考文献(References)：

〔1〕 王国庆，张建云，贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究〔J〕. 水科学进展，2006，17(6)：853－858.〔Wang Guoqing，Zhang Jianyun，He Ruimin. Impacts of environmental change on runoff in Fenhe river basin of the middle Yellow River〔J〕. Advances in Water Science，2006，17(6)：853－858.〕

〔2〕 Zhao G，Tian P，Mu X，et al. Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin，China〔J〕. Journal of Hydrology，2014，519(PA)：387－398.

〔3〕 Ahn K H，Merwade V. Quantifying the relative impact of climate and human activities on streamflow〔J〕. Journal of Hydrology，2014，515：257－266.

〔4〕 Zeng S，Xia J，Du H. Separating the effects of climate change and human activities on runoff over different time scales in the Zhang River basin〔J〕. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment，2014，28(2)：401－413.

〔5〕 Wang S，Yan M，Yan Y，et al. Contributions of climate change and human activities to the changes in runoff increment in different sections of the Yellow River〔J〕. Quaternary International，2012，282：66－77.

〔6〕 杨立哲，钱虹，郝璐. 锡林河近50年径流变化特征及其影响因素分析〔J〕. 草业科学，2015，32(3)：303－310.〔Yang Lizhe，Qian Hong，Hao Lu. Analysis of runoff variations and impact factors in Xilinhe River Basin in recent 50 years〔J〕. Pratacultural Science，2015，32(3)：303－310.〕

〔7〕 宋小园. 气候变化和人类活动影响下锡林河流域水文过程响应研究〔D〕. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2016.〔Song Xiaoyuan. Effects of Climate Change and Human Activities on the Hydrological Processes of Xilinhe River〔D〕. Hohhot：Inner Mongolia Agricultural University，2016.〕

〔8〕 焦玮，朱仲元，宋小园，等. 近50年气候和人类活动对锡林河流域径流的影响〔J〕. 中国水土保持科学，2015，13(6)：12－19.〔Jiao Wei，Zhu Zhongyuan，Song Xiaoyuan，et al. Impacts of

climate change and human activities on runoff yield of the Xilin river basin over nearly 50 years〔J〕. Science of Soil and Water Conservation,2015,13(6):12－19.〕

〔9〕 焦玮. 锡林河流域河川基流对气候变化与人类活动的响应特征研究〔D〕. 呼和浩特：内蒙古农业大学,2016.〔Jiao Wei. Research on the River Base Flow for the Response Characteristics of the Climate Change and Human Activities in Xilin River Basin〔D〕. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2016.〕

〔10〕 段利民,李玮,刘廷玺,等. 半干旱草原型流域径流变化特征及其影响因子定量分析〔J〕. 干旱区资源与环境,2017,31(10):125－130.〔Duan Limin,Li Wei,Liu Tingxi,et al. Runoff variation and driven factors qualification for a semi-arid steppe watershed〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2017,31(10):125－130.〕

〔11〕 刘浏,刘丽丽,索滢. 近53 a黑河流域水文气象要素时空演变特征〔J〕. 干旱区研究,2017,34(3):465－478.〔Liu Liu,Liu Lili,Suo Ying. Spatiotemporal evolution of hydro-meteorological variables in the Heihe river basin in recent 53 years〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(3):465－478.〕

〔12〕 商沙沙,廉丽姝,马婷,等. 近54 a中国西北地区气温和降水的时空变化特征〔J〕. 干旱区研究,2018,35(1):68－76.〔Shang Shasha,Lian Lishu,Ma Ting,et al. Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in Northwest China in recent 54 years〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(1):68－76.〕

〔13〕 Mann H B. Nonparametric tests against trend〔J〕. Econometrica,1945,13(3):245－259.

〔14〕 Kendall M G. Rank correlation methods〔J〕. British Journal of Psychology,1955,25(1):86－91.

〔15〕 Sneyers R R. Sneyers-Sur l'analyse statistique des séries d'observations〔J〕. Ciel Et Terre,1977,93:20－36

〔16〕 Sheng Yue,Paul Pilon. A comparison of the power of the t test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection/une comparaison de la puissance des tests t de Student,de Mann-Kendall et du bootstrap pour la dÃ© tection de tendance〔J〕. International Association of Scientific Hydrology Bulletin,2004,49(1):21－37.

〔17〕 Searcy J K,Hardison C H. Double-Mass Curves〔M〕. U. S. Geological Survey Water Supply Paper,1960:1 541－B.

〔18〕 穆兴民,张秀勤,高鹏,等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题〔J〕. 水文,2010,30(4):47－51.〔Mu Xingmin,Zhang Xiuqin,Gao Peng,et al. Theory of double mass curves and the its applications in hydrology and meteorology〔J〕. Journal of China Hydrology,2010,30(4):47－51.〕

〔19〕 王随继,闫云霞,颜明,等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析——累积量斜率变化率比较方法的提出及应用〔J〕. 地理学报,2012,67(3):388－397.〔Wang Suiji,Yan Yunxia,Yan Ming,et al. Contributions of precipition and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin: Application of comparative method of slope changing ratio of cumulative quantity〔J〕. Acta Geographica Sinica,2012,67(3):388－397.〕

〔20〕 Budyko M I. Climate and Life〔M〕. San Diego: Academic,1974.

〔21〕 Ol'dekop E M. On evaporation from the surface of river basins〔J〕. Transactions on Meteorological Observations University of Tartu,1911,4:200.

〔22〕 Budyko M I. Evaporation under Natural Conditions〔M〕. Leningrad: Gidrometeorizdat,1948.

〔23〕 Pike J G. The estimation of annual run-off from meteorological data in a tropical climate〔J〕. Journal of Hydrology,1964,2(2):116－123.

〔24〕 傅抱璞. 论路面蒸发的计算〔J〕. 大气科学,1981,5(1):23－31.〔Fu Baopu. On the calculation of the evaporation from land surface〔J〕. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,1981,5(1):23－31.〕

〔25〕 Zhang L,Dawes W R,Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale〔J〕. Water Resources Research,2001,37(3):701－708.

〔26〕 Wu J,Miao C,Zhang X,et al. Detecting the quantitative hydrological response to changes in climate and human activities〔J〕. Science of the Total Environment,2017,586:328－337.

〔27〕 李玮,刘廷玺,格日乐吐,等. 半干旱草原型流域不同时间尺度降水特征分析〔J〕. 干旱区地理,2017,40(2):304－312.〔Li Wei,Liu Tingxi,Geriletu,et al. Precipitation characteristics at different time scales for a semi-arid steppe watershed〔J〕. Arid Land Geography,2017,40(2):304－312.〕

〔28〕 朱映新. 苏州市降雨径流关系及下垫面变化对径流量影响研究〔D〕. 南京：河海大学,2007.〔Zhu Yingxin. Modeling of Rainfall and Runoff Relationship and Estimation of Influence of Land Surface Change on Runoff in Suzhou〔D〕. Nanjing: Hohai University,2007.〕

〔29〕 高妍,冯起,李宗省,等. 1957—2012年讨赖河流域降水变化特征〔J〕. 干旱区研究,2016,33(2):275－282.〔Gao Wei,Feng Qi,Li Zongsheng,et al. Change of precipitation in the Taolaihe river basin for the period of 1957－2012〔J〕. Arid Zone Research,2016,33(2):275－282.〕

〔30〕 呼日乐,乌珠穆. 锡盟落实草牧场双权一制技术应用及推广〔J〕. 内蒙古草业,1999(2):16－19.〔Hurile,Wu Zhumu. Ximeng implements the application and promotion of dual-power system technology in grassland〔J〕. Journal of Inner Mongolia Prataculture,1999(2):16－19.〕

〔31〕 齐振华,杜赞炯. 锡林浩特市锡林河流域水保大会战全面展开〔J〕. 水土保持通报,1999,19(5):6.〔Qi Zhenhua,Du Zanjiong. The battle of the water conservation conference of Xilin River Basin in Xilinhot City〔J〕. Bulletin of Soil and Water Conservation,1999,19(5):6.〕

Response of Runoff Volume Change to Climate Change and Human Activities in the Xilin River Basin

ZHANG Yan-xia[1], YU Rui-hong[1,2], XUE Hao[1], DUO Lan[1], HU Hai-zhu[1,2], LV Xi-xi[1]

(1. *College of Ecology and Environment/Inner Mongolia Key Laboratory of River and Lake Ecology, Inner Mongolia University, Hohhot* 010021, *Inner Mongolia, China*;

2. *Key Laboratory of Mongolian Plateau Ecology and Resources Utilization under Ministry of Education, Hohhot* 010021, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: Study on the quantitative response of runoff volume to climate change and human activities can not only provide a theoretical basis for the redistribution of water resources in a drainage basin, but also a policy reference for the management of water resources. This study was based on the hydrological and meteorological data series in the Xilin River Basin, a typical grassland basin, during the period from 1968 to 2015, and the Mann-Kendall trend test was used to analyze the change trend of runoff volume. The Mann-Kendall mutation test and the double-accumulation curve method were also used. The contribution rates of climate change and human activities to the change of runoff volume were quantified using the double-accumulation curve method, cumulant slope rate comparison method and elasticity analysis method. The results showed that the annual runoff volume in the Xilin River Basin was in a significant decrease trend during the period from 1968 to 2015, and its mutations occurred in 1984 and 2000 respectively. On which the period of 1968 – 1984 was regarded as the reference period, and the periods of 1985 – 2000 and 2001 – 2015 were the mutation periods. The results from the double-accumulation curve method revealed that the contribution rate of human activities to runoff volume varied in a range of 86% – 88%, which was quite different from the results obtained by other methods. The effects of both rainfall and evaporation on runoff volume were simultanously considered in the cumulant change rate comparison, so the results estimated by which and by the elasticity coefficient method were similar, and the contribution rates varied in ranges of 52.44% – 69.02% (1985 – 2000) and 42.39% – 43.64% (2001 – 2015) respectively. Holistically, the foundations and structures of different quantitative methods were different, the multiple methods were integrated in the elastic coefficient method, and this method was more reliable in quantifying the response of runoff volume in the Xilin River Basin.

Key words: runoff volume; human activity; climate change; quantitative response; Xilin River Basin